

AIGEARBOXDESIGNER: SOFTWARE PARA EL DISEÑO INTELIGENTE DE CAJAS REDUCTORAS DE ENGRANAJES CILÍNDRICOS Y CARCASA SOLDADA

**Rosendo Franco¹, Michael A. Blas¹, Luis H. Inafuku¹, Angel A. C. Peinado¹, Jean C. Soto¹,
Alberto E. Solano¹, Daniel H. Fernandez¹, Alexander R. López¹, José F. Montalván¹,
Quino Valverde¹, Herbert Yépez¹**

1. Grupo INACOM/Aula PUCP-CIMNE, Sección Ing. Mecánica, Dpto. de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 32-Perú
e-mail: rofranco@pucp.edu.pe

Resumen

El presente trabajo reporta el desarrollo de un software inteligente que permite diseñar cajas reductoras de engranajes cilíndricos y carcasa soldada con un alto grado de automatización. En la actualidad existe una gran cantidad de software CAD con opciones para diseñar elementos de máquinas, pero no se conoce alguno que esté orientado al diseño íntegro de cajas reductoras. Esto se debe a que una caja reductora es un producto de gran complejidad, en el que se involucran muchas variables y, a su vez, existen innumerables alternativas de solución para una misma necesidad. Para superar estas dificultades los autores han utilizado la técnica de Inteligencia Artificial conocida como Razonamiento Basado en Casos. El software desarrollado cuenta con los módulos característicos de un sistema basado en casos: una base de casos resueltos, un módulo de recuperación y un módulo de adaptación. La ventaja principal de este tipo de sistemas es que logran adquirir la experiencia (conocimiento) de los especialistas y la almacenan a través de los casos resueltos. Esta experiencia es reutilizada en la solución de nuevos problemas. Durante el proceso de investigación fue necesario definir las características principales que describen una caja reductora, es decir, sus rasgos de semejanza, así como establecer la función de semejanza e implementar una técnica de adaptación paramétrica. Adicionalmente, el software cuenta con módulos de cálculo y selección de los componentes de una caja reductora, para afinar el diseño hasta alcanzar los niveles de exigencia establecidos por las normas técnicas o por el usuario. La implementación se realizó en lenguaje Visual Basic en forma de un complemento (*Add-In*), que se carga automáticamente en el entorno de Autodesk Inventor. A partir de los datos de entrada, el programa desarrollado, denominado *aiGearboxDesigner*, es capaz de generar un diseño completo, los modelos 3D y sus correspondientes planos de fabricación.

Palabras claves: diseño mecánico, caja reductora, razonamiento basado en casos, inteligencia artificial

1. Introducción

El diseño de cajas reductoras es una tarea de alta demanda de tiempo y, en muchos aspectos, repetitiva para el diseñador. En la actualidad existen muchas herramientas computacionales que ayudan en el diseño de componentes mecánicos, tales como engranajes, árboles, rodamientos y tornillería, entre otros accesorios. Sin embargo, no se ha encontrado una herramienta específica para diseñar carcasas, que es un componente fundamental. Por tanto, tampoco se ha encontrado algún software que permita diseñar íntegramente una caja reductora, de manera automatizada. Dentro de los softwares más conocidos, relacionados con el diseño de cajas reductoras, se encuentran MASTA [1], RomaxDESIGNER [2] y KISSsoft [3], entre otros. Para el uso adecuado de estos programas se requiere de mucha experiencia y conocimientos en diseño de los elementos de máquina que componen una caja reductora, pues el nivel de interacción del usuario es muy alto. En tal sentido, un software que permita realizar el diseño automatizado de cajas reductoras sería de gran utilidad.

Una de las prácticas típicas en el proceso de diseño de máquinas y, por supuesto, de cajas reductoras, consiste en reutilizar diseños existentes, con características similares al nuevo requerimiento. Para ello se modifican los parámetros necesarios en el diseño existente, hasta cumplir con las exigencias de la nueva solicitud. Precisamente, el Razonamiento Basado en Casos (RBC), es una técnica de Inteligencia Artificial que se basa en aprovechar la experiencia y conocimiento sobre un problema resuelto para resolver uno nuevo [4, 5]. Esta técnica es empleada en distintas ramas de la ciencia y la tecnología, incluida la ingeniería. Existen evidencias de que el RBC se ha utilizado en el diseño mecánico y, específicamente, en el diseño de transmisiones por engranajes [6, 7]. Aimin et. al. [8] desarrolló una aplicación de RBC para diseñar cajas reductoras de dos etapas, en la que las modificaciones, luego de la fase de adaptación, se dejan a total responsabilidad del usuario, lo que limita el grado de automatización del programa.

El software desarrollado por los autores, *aiGearboxDesigner*, tiene como objetivo realizar el diseño integral de cajas reductoras de velocidad con un alto grado de automatización. Actualmente, el software se enfoca en el diseño de cajas reductoras con ejes paralelos horizontales, de engranajes cilíndricos, de dos y tres etapas, y con carcasa soldada. Para lograr esto el software cuenta

con los módulos característicos de un sistema de RBC: una base de casos, un módulo de recuperación y un módulo de adaptación. Adicionalmente, se integra un módulo para la puesta a punto del diseño, que realizará el afinamiento del diseño luego de la fase de adaptación o de modificaciones realizadas por el usuario, para obtener el diseño final. Por otro lado, el usuario tiene la opción de realizar modificaciones al diseño luego de la fase de adaptación o de la fase de puesta a punto, ya sea para considerar algún requerimiento especial o para aportar criterios a partir de su propia experiencia.

2. Aplicación del RBC

Un sistema de RBC está compuesto por tres elementos esenciales: una base de casos, un módulo de recuperación y un módulo de adaptación. En la figura 1 se puede apreciar un diagrama general del sistema desarrollado, en el que se distinguen los tres componentes mencionados. También se observa un módulo de puesta a punto, previo al diseño final, el cual será explicado más adelante.

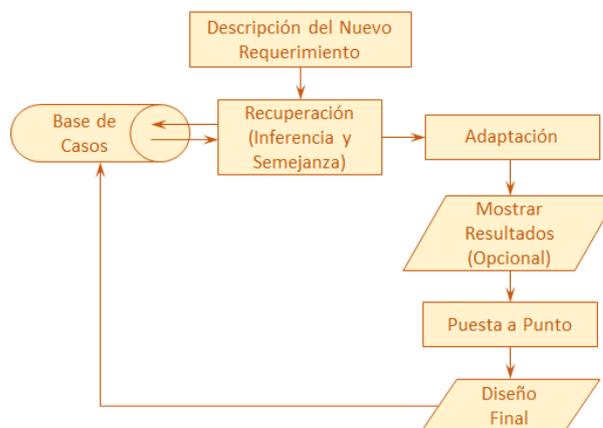


Figura 1: Diagrama general de *aiGearboxDesigner*.

Los casos se caracterizan por sus parámetros fundamentales, los mínimos necesarios para realizar el diseño de una caja reductora, estos son: potencia a transmitir (P), velocidad de entrada (n_i), velocidad de salida (n_s), vida de la transmisión (L_h) y alineación del árbol de salida con respecto al árbol de entrada (Al). Estos parámetros son los rasgos de la caja reductora, que se almacenan en la base de casos, aparte de un archivo que contiene todos los detalles del diseño. El módulo de recuperación tiene como finalidad recuperar el caso de mayor semejanza, a partir de los datos del nuevo diseño, para lo cual se emplea la función de semejanza. Luego, el módulo de adaptación se encarga de modificar el diseño recuperado para que este cumpla con las

especificaciones del nuevo requerimiento. Para ello se utilizan reglas de adaptación, basadas en recomendaciones para el diseño de los diferentes componentes.

2.1 Base de Casos

La base de casos es una base de datos que contiene los casos resueltos. Los datos de un caso consisten en sus rasgos, mencionados anteriormente, y en un archivo XML, que contiene la información detallada de cada componente y del ensamblaje. La base de datos se desarrolló en lenguaje SQL, utilizando el software libre SQLite, a través de su librería System.Data.SQLite para .NET.

2.2 Recuperación

Esta etapa tiene como objetivo recuperar, de la base de casos, el caso más semejante al nuevo requerimiento. Para esto se utiliza la función de semejanza expresada en la ecuación (1).

$$S(u, v) = \frac{\sum \omega_i \cdot \delta_i(u, v)}{\sum \omega_i} \quad (1)$$

Donde ω_i es el peso del rasgo i , δ_i es el criterio de comparación del rasgo i , u es el rasgo del caso almacenado y v es el rasgo del nuevo requerimiento. Los pesos de los rasgos son los valores de importancia que se le asignan a cada uno de ellos. En la tabla 1 se muestran los rasgos de semejanza y los pesos utilizados en la presente aplicación. Tiene mayor peso el rasgo que impacta de manera más significativa en el diseño de la caja reductora, los valores mostrados se han definido en base a consultas realizadas a expertos y a la investigación realizada por los autores del trabajo.

Tabla 1: Rasgos de semejanza y sus pesos.

Rasgo de semejanza	Peso (ω)
Relación de transmisión (i)	1
Potencia (P)	0.5
Vida de la transmisión (L_h)	0.5
Alineación del árbol de salida (Al)	0.75

El criterio de comparación del rasgo, entre el caso almacenado y el nuevo requerimiento, depende del tipo de dato con que se representa el rasgo. En la presente aplicación se han utilizado dos tipos de dato: numérico y lógico [4]. Para el caso de los rasgos representados numéricamente (relación de transmisión, potencia y vida de la transmisión) se emplea el método de la distancia entre rasgos, definido por la expresión (2).

$$\delta(u, v) = 1 - \frac{|u - v|}{u_{m\acute{a}x} - u_{m\acute{i}n}} \quad (2)$$

Donde $u_{m\acute{a}x}$ y $u_{m\acute{i}n}$ representan los valores máximos y mínimos del rasgo analizado, en el dominio de la base de casos. Por el momento, el dato lógico se utiliza solamente para comparar el rasgo relacionado con la alineación del árbol de salida, el cual puede tomar dos posibles valores: “Mismo lado” o “Lado opuesto”. Este criterio se define a través de la expresión (3).

$$\delta(u, v) = \begin{cases} 1, & u = v \\ 0, & u \neq v \end{cases} \quad (3)$$

La aplicación desarrollada muestra en pantalla los casos con mayor semejanza, según la ecuación (1), y permite al usuario seleccionar (recuperar) el caso que se adaptará. Por defecto se trabajará con el caso que presente la mayor semejanza.

2.3 Adaptación

En general, el caso recuperado no satisface plenamente las exigencias del nuevo requerimiento, pudiendo incluso estar bastante alejado de ello. En la etapa de adaptación se obtiene una primera aproximación del diseño, cercana al requerimiento solicitado, pero que no es aún el diseño final. La adaptación se realiza a partir de recomendaciones para el “cálculo rápido” de algunos componentes que conforman la caja reductora, así como de relaciones geométricas que deben cumplirse entre todos los componentes. En tal sentido, las recomendaciones de cálculo permiten modificar solamente algunos parámetros clave, el resto de parámetros se adapta a través de las relaciones geométricas.

Primero se realiza el cálculo de la relación de transmisión total, según la expresión (4), y con ello se define el número de etapas de la caja reductora, empleando las recomendaciones detalladas en la tabla 2 [9, 10]. En la misma tabla 2 se muestran las relaciones de transmisión parciales en función de la relación de transmisión total.

$$i = \frac{n_i}{n_s} \quad (4)$$

Tabla 2: Nro. de etapas y relaciones de transmisión parciales.

Relación total	Etapas	Relaciones parciales
$i < 45$ (máx. 60)	2	$i_1 \approx 1.25 \cdot \sqrt{i}$
$i < 200$ (máx. 300)	3	$i_2 \approx 1.25 \cdot \sqrt{i/i_1}$

El cálculo del número de etapas se realiza antes de la recuperación, de manera que los casos son filtrados por el número de etapas. De este modo el número de etapas no se ha considerado un rasgo, ya que resultaría muy complicado adaptar una caja reductora de dos etapas para obtener una de tres etapas y viceversa. Consecuentemente, la base de casos más básica debe contener, al menos, una caja reductora de dos etapas y una de tres etapas.

Los componentes que presentan parámetros clave son los engranajes y los árboles. En los engranajes se adapta el número de dientes de las coronas en función de las relaciones de transmisión parciales, manteniendo el número de dientes del caso recuperado en los piñones. También se adapta el valor del módulo normal (m_n), según las expresiones (5) y (6), en función del torque equivalente (T_{1eq}), que considera el factor de aplicación de la caja reductora [10].

Para engranajes con dientes endurecidos:

$$m_n \approx 1.85 \cdot \sqrt[3]{\frac{T_{1eq} \cdot \cos^2 \beta}{Z_1^2 \cdot \psi_d \cdot \sigma_{flim}}} \quad (5)$$

Para engranajes con dientes sin endurecer:

$$m_n \approx \frac{95 \cdot \cos \beta}{Z_1} \cdot \sqrt[3]{\frac{T_{1eq}}{\psi_d \cdot \sigma_{flim}^2} \cdot \frac{i+1}{i}} \quad (6)$$

En los árboles se adapta el diámetro de la sección donde se ubica el engranaje. La recomendación dada por la ecuación (7) permite estimar el diámetro en árboles de transmisión que trabajan a torsión y flexión, y que tienen concentradores de esfuerzos, como canales para chavetas o secciones de apoyos [11].

$$d \approx (5 \text{ a } 6) \cdot \sqrt[3]{\frac{T}{\sigma_f}} \quad (7)$$

En estas expresiones, el ángulo de la helicoidal (β), el número de dientes del piñón (Z_1), las propiedades del material (σ_{flim}), etc., no se adaptan, sino que toman los valores del caso recuperado. Este hecho permite escribir las ecuaciones para el nuevo diseño como se muestra en (8) y (9).

$$m_{n \text{ diseño}} \approx m_{n \text{ caso}} \cdot \sqrt[3]{\frac{T_{\text{diseño}}}{T_{\text{caso}}}} \quad (8)$$

$$d_{\text{diseño}} \approx d_{\text{caso}} \cdot \sqrt[3]{\frac{T_{\text{diseño}}}{T_{\text{caso}}}} \quad (9)$$

Al aplicar estas expresiones, se tiene en cuenta que el módulo del engranaje está normalizado según la norma DIN 780 y que el diámetro del árbol toma valores preferidos, según criterios de fabricación. Al modificar los parámetros clave mencionados anteriormente (números de dientes de las coronas, módulos y diámetros de los árboles), el resto de parámetros se adapta de acuerdo con las relaciones geométricas establecidas.

El proceso de adaptación involucra el redimensionamiento de varios componentes y una nueva selección de elementos normalizados. Para lograr este objetivo es necesario que el modelo geométrico de la caja reductora esté bien estructurado y parametrizado. Fue por ello que se utilizó la programación orientada a objetos, a través del lenguaje Visual Basic .NET, definiendo las clases necesarias para representar adecuadamente una caja reductora. La clase principal se denomina “Caja Reductora”, que tiene como propiedades a las clases “Subensamble Árbol” y “Subensamble Carcasa”. Estas dos clases representan los subensambles que componen a una caja reductora y a su vez se descomponen en otras clases que representan a sus componentes. En la figura 2 se muestra la estructura de objetos utilizada para la aplicación desarrollada.



Figura 2: Estructura de objetos de *aiGearboxDesigner*.

Una vez adaptados los parámetros clave, se procede a la adaptación de todos los componentes en función de los cambios realizados. Esta etapa del proceso se divide en dos partes. La primera parte está asociada al “Subensamble Árbol”, cuya secuencia de adaptación se muestra en la figura 3. Teniendo en cuenta que una caja reductora está formada por un número de “Subensamble Árbol” igual al número de etapas más uno, la secuencia descrita en la figura 3 se repite para cada uno de ellos.

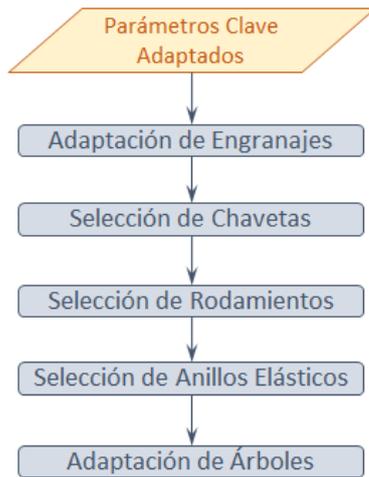


Figura 3: Secuencia de adaptación “Subensamble Árbol”.

La segunda parte está asociada al “Subensamble Carcasa” y su secuencia de adaptación se muestra en la figura 4.

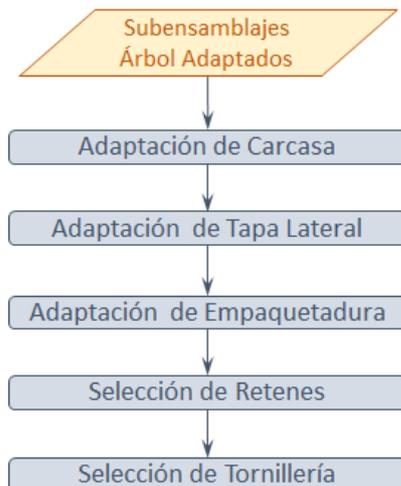


Figura 4: Secuencia de adaptación “Subensamble Carcasa”.

3. Puesta a punto

Como ya se mencionó, la adaptación permite obtener un diseño preliminar, que cumple con las relaciones geométricas entre los diferentes componentes y que sus parámetros tienen una mejor aproximación que el caso recuperado, respecto al nuevo requerimiento. Sin embargo, no

se puede asegurar que luego de la adaptación el diseño obtenido cumpla con todas las exigencias de diseño deseadas por el usuario, como son los factores de seguridad de los componentes, la vida de la transmisión, entre otros. Por esta razón, se requiere una etapa adicional que permita poner a punto el diseño obtenido a partir del proceso de adaptación.

Antes de proceder con la puesta a punto del diseño, el usuario puede modificar algunos parámetros, de acuerdo con su necesidad y experiencia. Esto es importante porque es posible que el usuario tenga ciertas restricciones para la fabricación del nuevo diseño, por ejemplo, que no disponga de los mismos materiales que se utilizaron en el caso recuperado o el mismo tipo de rodamientos, entre otros. Además, si el usuario es experimentado podría sugerir algunas modificaciones para mejorar el diseño. En la figura 5 se muestra el diagrama de la etapa de puesta a punto, en el que se distinguen el proceso iterativo de comprobación de los componentes y la intervención del usuario.

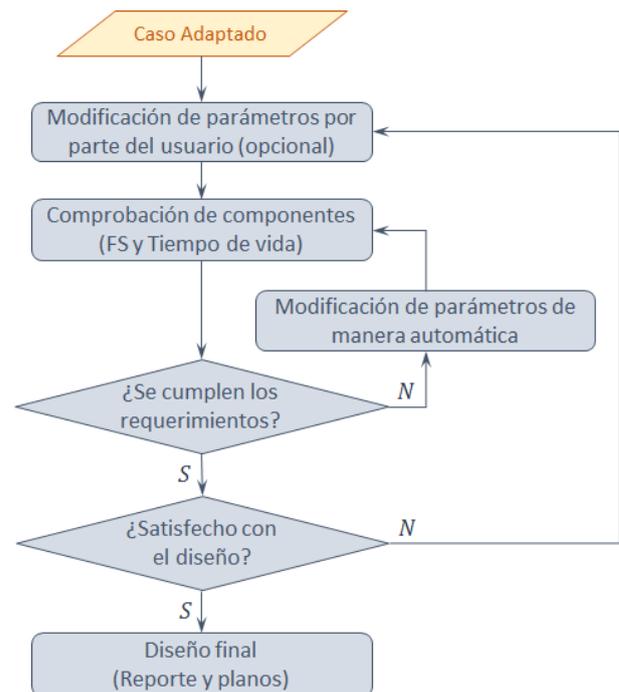


Figura 5: Diagrama de la fase de puesta a punto.

3.1 Comprobación de componentes

El proceso iterativo de comprobación de los componentes comprende el cálculo del criterio de referencia, es decir, del factor de seguridad o del tiempo de vida, según sea el caso. Si el diseño no cumple con lo especificado, el software irá modificando de manera automática algunos parámetros hasta satisfacer todos los requerimientos.

La comprobación de los componentes se rige por normas y fundamentos de diseño de elementos de máquinas. Algunos elementos simplemente se seleccionan en base a las dimensiones de otros componentes, como es el caso de los anillos elásticos y de los retenes.

Para la comprobación de los engranajes se emplean las normas ISO 6336-1, 6336-2 y 6336-3, que establecen los lineamientos para el diseño de estos componentes, incluyendo recomendaciones sobre el factor de engrane y los factores de seguridad a contacto y a flexión. Para la comprobación de los árboles se emplean los fundamentos de la resistencia de materiales, pudiendo verificarlos por resistencia, rigidez y fatiga [12]. En esta referencia se encuentran recomendaciones sobre los factores de seguridad mínimos y las deflexiones máximas que admiten estos componentes. Por el momento se han considerado rodamientos rígidos por las normas DIN. Los rodamientos más empleados en aplicaciones de cajas reductoras son los rodamientos de bolas (DIN 625), esféricos (DIN 635T1), cilíndricos (DIN 5412) y cónicos (DIN 720), por sus características para soportar las cargas presentes en estos equipos. Para el cálculo de la vida de los rodamientos se implementaron dos alternativas: una dada por la firma SKF, y otra por la firma NSK, dedicadas a la fabricación y distribución de estos componentes. Para las chavetas se consideraron las medidas normalizadas según DIN 6885, y se verifican la resistencia al esfuerzo cortante y al esfuerzo por aplastamiento. Los anillos elásticos empleados corresponden a los establecidos en la norma DIN 471. Como se mencionó, la caja reductora tendrá una carcasa soldada, que es un elemento no normalizado. En este caso se siguieron algunas recomendaciones generales disponibles en la literatura especializada y se desarrolló un procedimiento de cálculo que combina métodos analíticos y de simulación numérica, para determinar los esfuerzos en las paredes laterales [13]. La tornillería está restringida por las normas DIN 931 (tornillos de cabeza hexagonal), DIN 934 (tuercas) y DIN 125 (arandelas). Varios cálculos de resistencia son recopilados de bibliografía que trata sobre el diseño de elementos de máquinas [12, 14, 15].

3.2 Intervención del usuario y diseño final

Luego de la etapa de comprobación de componentes, se tiene el diseño de una caja reductora funcional, que satisface todas las restricciones de diseño. Sin embargo, como ya se mencionó, el diseñador podría realizar alguna modificación adicional antes de obtener el diseño

final. Es decir, el usuario puede realizar modificaciones en dos momentos distintos del proceso de diseño de la caja reductora. Primero: después de realizar la adaptación del caso recuperado. Segundo: después de la comprobación de los componentes y puesta a punto del diseño. En el segundo caso, el programa volverá a realizar el proceso de comprobación de componentes y puesta a punto del diseño, descrito anteriormente.

Una vez que el usuario o diseñador acepta el diseño, se pasa a la etapa de generación de los planos de fabricación y ensamblaje. También se podrá generar un reporte de los resultados obtenidos y visualizar o revisar el diseño en 3D. Finalmente, se podrá añadir este diseño a la base de casos, para que sea utilizado en futuros diseños.

4. Implementación del software

El software es un complemento (*Add-In*) que funciona en la plataforma de *Autodesk Inventor Professional 2017* o superior. Esta plataforma fue elegida por las facilidades que ofrece para la generación y parametrización de modelos 3D, así como por contar con amplias librerías de los elementos normalizados utilizadas en el diseño de cajas reductoras.

En la figura 6 se muestra una porción de la pestaña que se creó y que se añade a la cinta de comandos cuando se carga el software. En ella se visualizan algunas de las opciones que forman parte de *aiGearboxDesigner*, las cuales se irán habilitando a medida que se vaya avanzando con el diseño. La figura muestra el estado de la pestaña antes de iniciar un nuevo diseño o abrir uno existente.

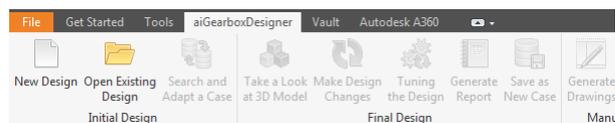


Figura 6: Add-In “aiGearboxDesigner” en Autodesk Inventor.

En el caso de iniciar un nuevo diseño se mostrará la ventana de la figura 7, donde se ingresará la ruta de trabajo y el nombre del proyecto. Luego se abrirá la ventana mostrada en la figura 8, que permite ingresar los datos requeridos para el nuevo diseño. Al presionar el botón *Search a case*, el programa ejecutará el módulo de recuperación y mostrará los casos recuperados en la parte derecha de la ventana, donde se indicará el valor de similaridad calculado y demás parámetros de cada caso. Por defecto estará seleccionado el caso de mayor similaridad, pero el usuario podrá escoger otro para proceder con la adaptación del mismo, mediante el botón *Adapt selected case*.

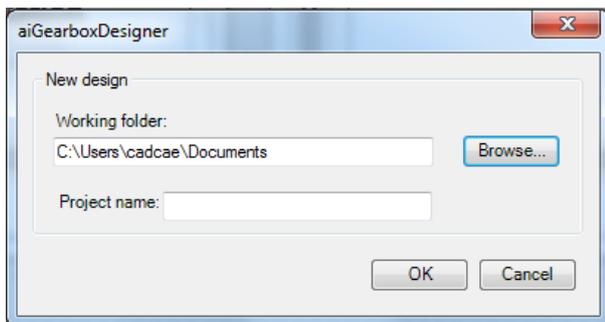


Figura 7: Inicio de un nuevo diseño.

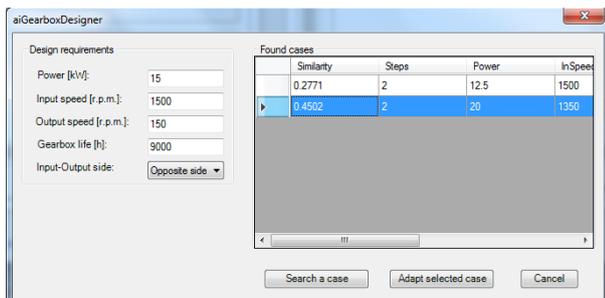


Figura 8: Ingreso de datos y casos recuperados.

Después de estos pasos se habilitarán varios botones de la pestaña creada y mostrada en la figura 6. Mediante el botón *Take a Look at 3D Model*, se abrirá en la ventana de trabajo el modelo 3D del ensamblaje con el caso ya adaptado. Esto se puede observar en la figura 9.

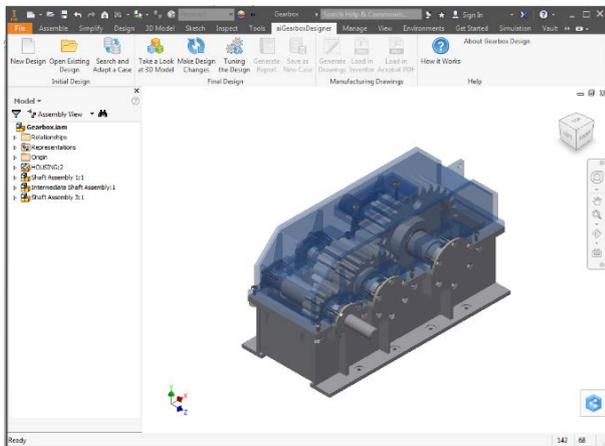


Figura 9: Modelo 3D del caso adaptado.

En este punto el usuario puede realizar algunos cambios si así lo desea, a través del botón *Make Design Changes*, o proceder a la puesta a punto del diseño final, con el botón *Tuning the Design*. En la figura 10 se muestra el formulario que se abre al presionar el botón *Make Design Changes*, donde se aprecian los parámetros que se pueden modificar en los engranajes, árboles, rodamientos y carcasa. En esta misma ventana se tiene un botón que permite acceder a una configuración avanzada de los diferentes componentes. En la figura 11 se muestra la ventana para realizar cambios avanzados en el diseño de un par de engranajes.

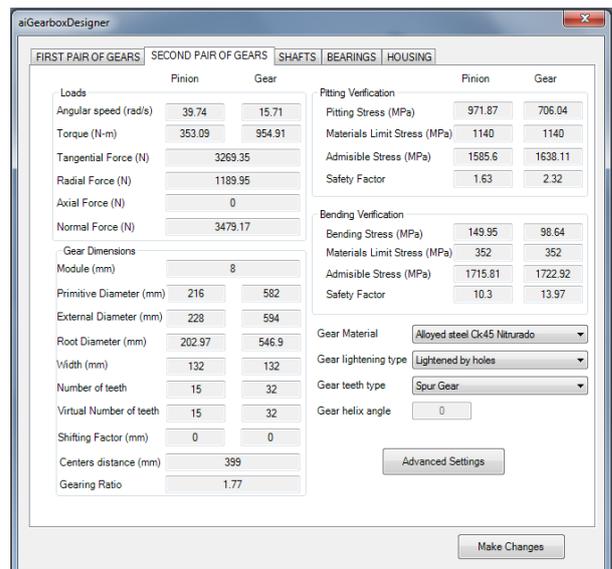


Figura 10: Formulario para hacer cambios en el diseño.

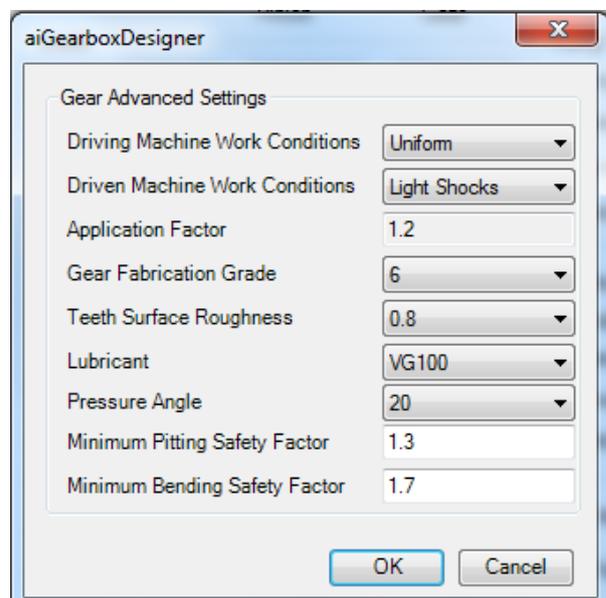


Figura 11: Configuración avanzada para el diseño de engranajes.

Al terminar el proceso de afinamiento del diseño se habilitan las opciones para la generación de los planos de fabricación, el reporte de diseño y guardar el nuevo diseño como un nuevo caso en la base de casos. Sin embargo, como ya se comentó, en este punto el usuario puede realizar otras modificaciones y repetir nuevamente el proceso de afinamiento.

El botón de generación de reporte, *Generate Report*, mostrará una ventana similar a la mostrada en la opción *Make Design Changes* (figura 10). En esta aparecerán algunos parámetros adicionales y un botón para guardar el reporte en formato PDF. El botón para la generación de planos muestra la ventana de la figura 12. En esta se permite generar los planos de los componentes con geometría no estandarizada. Estos pueden ser generados en la

misma plataforma de *Autodesk Inventor* o en formato PDF.

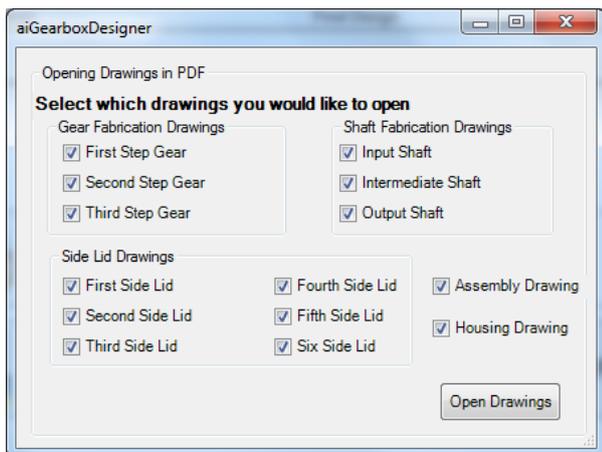


Figura 12: Ventana para generar los planos de fabricación.

En la figura 13 se muestra un ejemplo de un plano generado en formato PDF de un engranaje de la caja reductora.

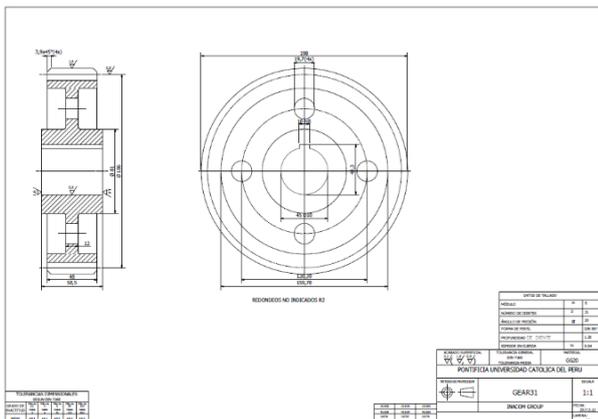


Figura 13: Plano de fabricación de la corona de la primera etapa.

5. Conclusiones

Se logró desarrollar un software con un alto grado de automatización que permite diseñar cajas reductoras de velocidad de mediana y alta potencia, de engranajes cilíndricos rectos y helicoidales, de dos y tres etapas, de disposición horizontal y carcasa soldada.

El alto grado de automatización del software no impide al diseñador la posibilidad de intervenir en el diseño y de realizar modificaciones, según sus necesidades y experiencia.

La Inteligencia Artificial, a través de la técnica del Razonamiento Basado en Casos, resulta ser de gran utilidad en la tarea de diseño de

máquinas. La experiencia de este trabajo permite sugerir su uso en el diseño de otros equipos y máquinas.

6. Agradecimientos

A la Dirección de Gestión de la Investigación (DGI) de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por haber financiado la investigación a través del proyecto DGI-2015-197 “Desarrollo de un sistema inteligente de diseño mecánico para mejorar la competitividad de la empresa metalmeccánica nacional aplicado a cajas reductoras de engranajes cilíndricos con carcasa soldada de uso en la industria minera”. También es apreciada la colaboración de otros integrantes del Grupo de Investigación Asistida por Computadora (INACOM) que contribuyeron con sus aportes al desarrollo del presente trabajo.

7. Referencias

- [1] Smart Manufacturing Technology, *MASTA*, www.smartmt.com/cae-software/masta/, Fecha de consulta: junio de 2017.
- [2] Romax Technology, *RomaxDESIGNER*, www.romaxtech.com/software/romaxdesigner/, Fecha de consulta: junio de 2017.
- [3] KISSsoft AG, *KISSsoft*, www.kisssoft.ch/, Fecha de consulta: junio de 2017.
- [4] Lenz, M., Bartsch-Spörl, B., Burkhard, H. D., & Wess, S., *Case-based reasoning technology: from foundations to applications*, Springer, 1998.
- [5] Avramenko, Y., & Kraslawski, A., *Case based design: applications in process engineering*, Springer, 2008.
- [6] Moya-Rodríguez, J. L., Becerra-Ferreiro, A. M., & Chagoyén-Méndez, C. A., “Utilización de Sistemas Basados en Reglas y en Casos para diseñar transmisiones por tornillo sinfín”, *Ingeniería Mecánica*, 15(1): 01-09, 2012.
- [7] Hu, C. W., Zhao, D. S., & Chen, X. D., “Knowledge Base System of spiral bevel gear based on design tree”, *Advanced Materials Research*, 472:1739-1743, 2012.
- [8] Huanmin, J. A. H. Q. X., & Zhengming, C. H. E. N., “Design System of the two-step gear reducer on Case-Based Reasoning”, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 22(5): 671-679, 2009.
- [9] Niemann, G., *Tratado teórico-práctico de elementos de máquinas: cálculo, diseño y construcción*, Editorial Labor, 1973.
- [10] Wittel, H., Muhs, D., & Jannasch, D., *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung*,

Berechnung, Gestaltung-Lehrbuch und Tabellenbuch, Springer-Verlag, 2011.

- [11] Klebanov, B. M., Barlam, D. M., & Nystrom, F. E, *Machine elements: life and design*, CRC Press, 2007.
- [12] Dobrovolsky, V., *Elementos de Máquinas*, Editorial MIR, 1976.
- [13] Blas, M., *Desarrollo de un algoritmo para el diseño de carcasas soldadas para cajas reductoras de engranajes cilíndricos*, PUCP, 2016.
- [14] Orlov, P., *Ingeniería de Diseño*, Editorial MIR, 1985.
- [15] Decker, K., *Elementos de máquinas*, Urmo, 1980.